

DISEÑO HIDROLÓGICO



Edición 2023

Rafael Terra

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

rterra@fing.edu.uy

DISEÑO HIDROLÓGICO

Objetivos

- ❖ Al finalizar el curso el estudiante estará en condiciones de evaluar el impacto de los eventos hidrológicos sobre un sistema hídrico y de **seleccionar magnitudes de diseño de las variables más importantes del sistema, para el control y uso del agua**, de modo que éste se comporte adecuadamente
- ❖ Proporcionar al estudiante los fundamentos del diseño hidrológico y la **evaluación del riesgo, en un contexto de cambio de uso del suelo, vulnerabilidad, variabilidad y cambio climático**, e introducir herramientas básicas de modelación hidrológica

NO ESTACIONARIEDAD DE PARÁMETROS DE DISEÑO

- ❖ En la definición de la **demandas** asociadas a aprovechamientos u otras condicionantes (legales, ambientales, económicas ...)
- ❖ En los **eventos hidrológicos** que determinan el diseño (ciclo estacional, sequía crítica, crecida de diseño ...)

NO ESTACIONARIEDAD DE PARÁMETROS DE DISEÑO

❖ Mirada al pasado

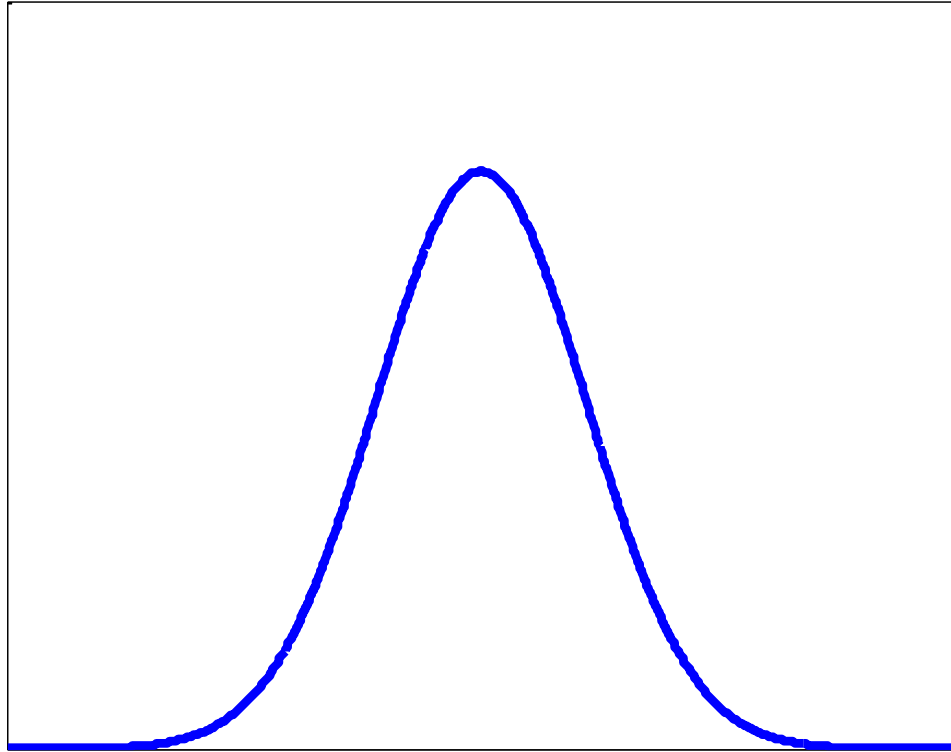
- ✓ En variables hidrometeorológicas locales
- ✓ En una mirada de cambio climático global

❖ Proyecciones y Escenarios

- ✓ Causalidades
- ✓ Modelos de base física
- ✓ Proyecciones estadísticas

❖ ¿Cómo abordar el diseño?

EL CLIMA ES LO QUE ESPERAMOS



Lo representamos por una distribución de la cual podemos derivar los estadísticos de interés al caso

Todo lo cual estimamos del pasado

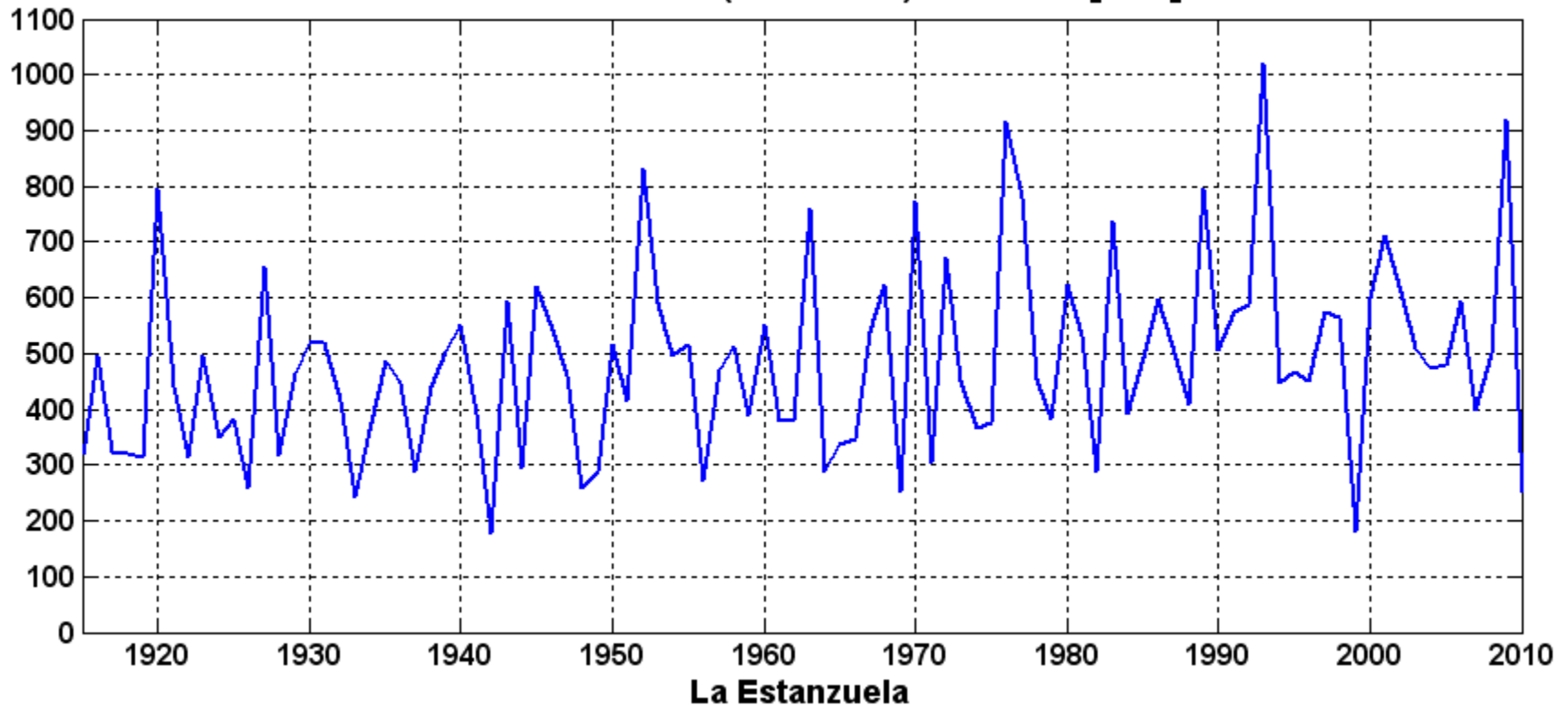
CAMBIA EL CLIMA CON LOS AÑOS ...

- ❖ Para **definir el clima** de una cierta variable en un sitio se recomienda típicamente 30 años de registro
- ❖ Es, por tanto, difícil determinar **sesgos en el clima**; ciertamente no alcanza con unas pocas realizaciones
- ❖ Aún más delicado es determinar mecanismos y asignar **causalidades** que sustenten proyecciones

ESCALAS TEMPORALES DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Un ejemplo

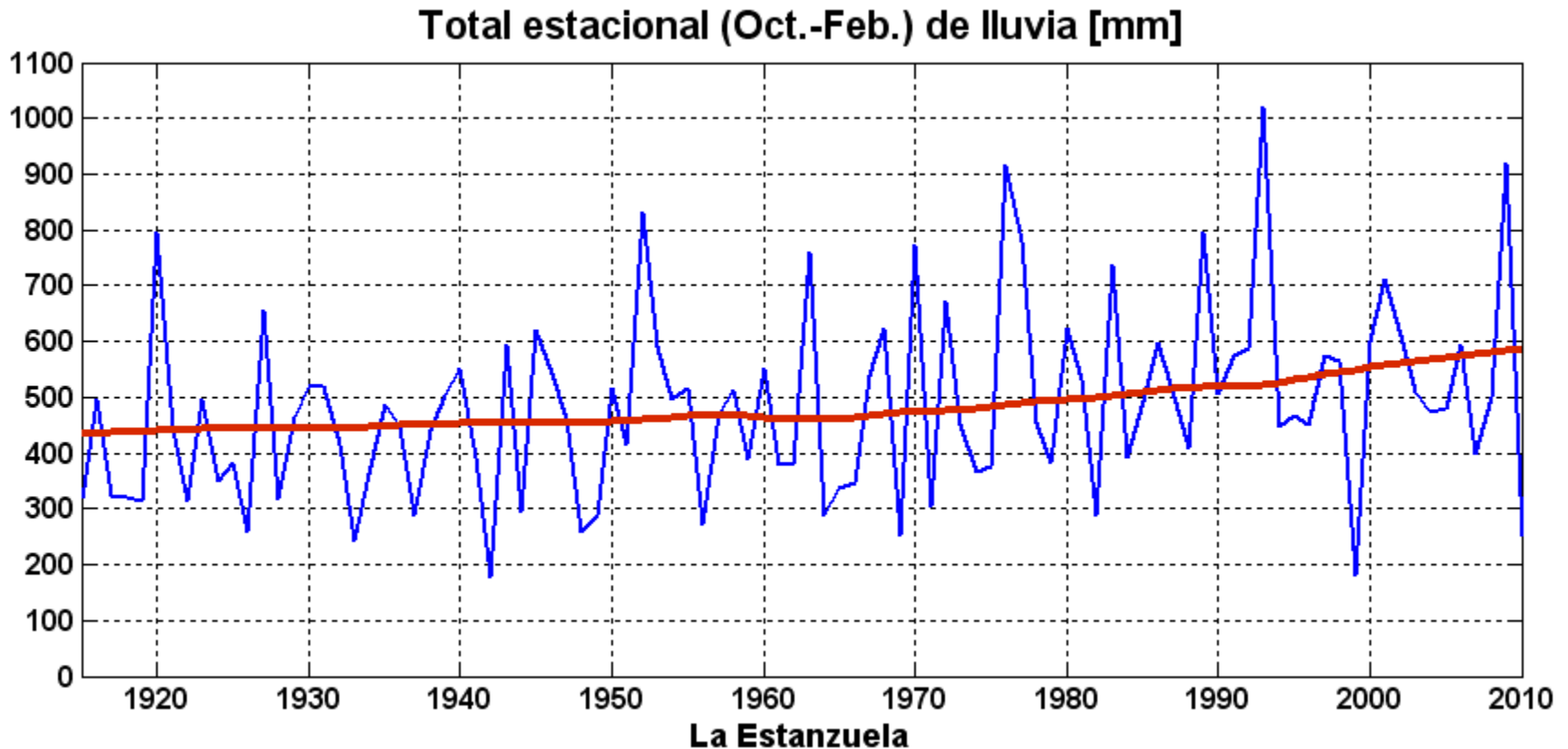
Total estacional (Oct.-Feb.) de lluvia [mm]



Tendencia creciente significativa al 99.6% según test Kendall-Mann

ESCALAS TEMPORALES DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Un ejemplo

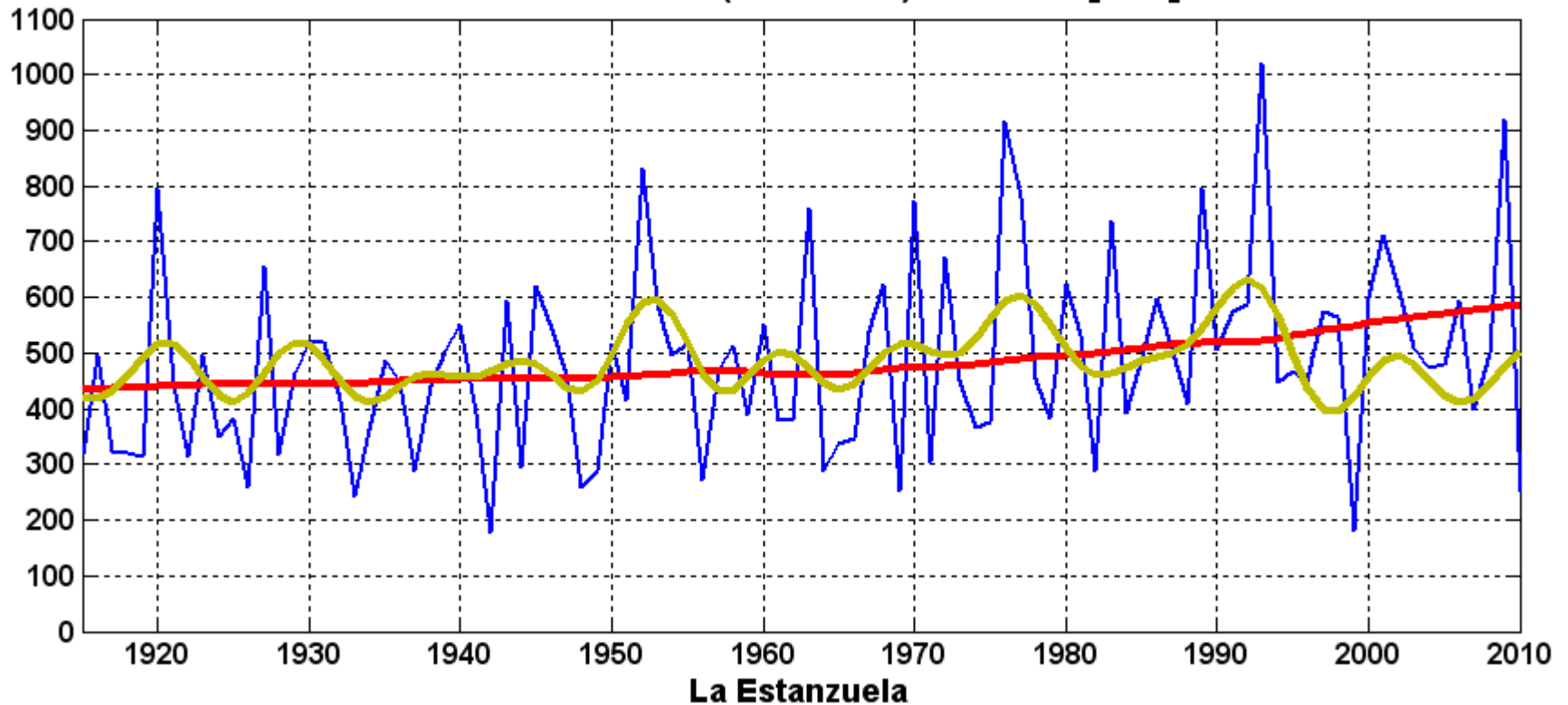


6% de la varianza (Proyección sobre calentamiento global)

ESCALAS TEMPORALES DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Un ejemplo

Total estacional (Oct.-Feb.) de lluvia [mm]

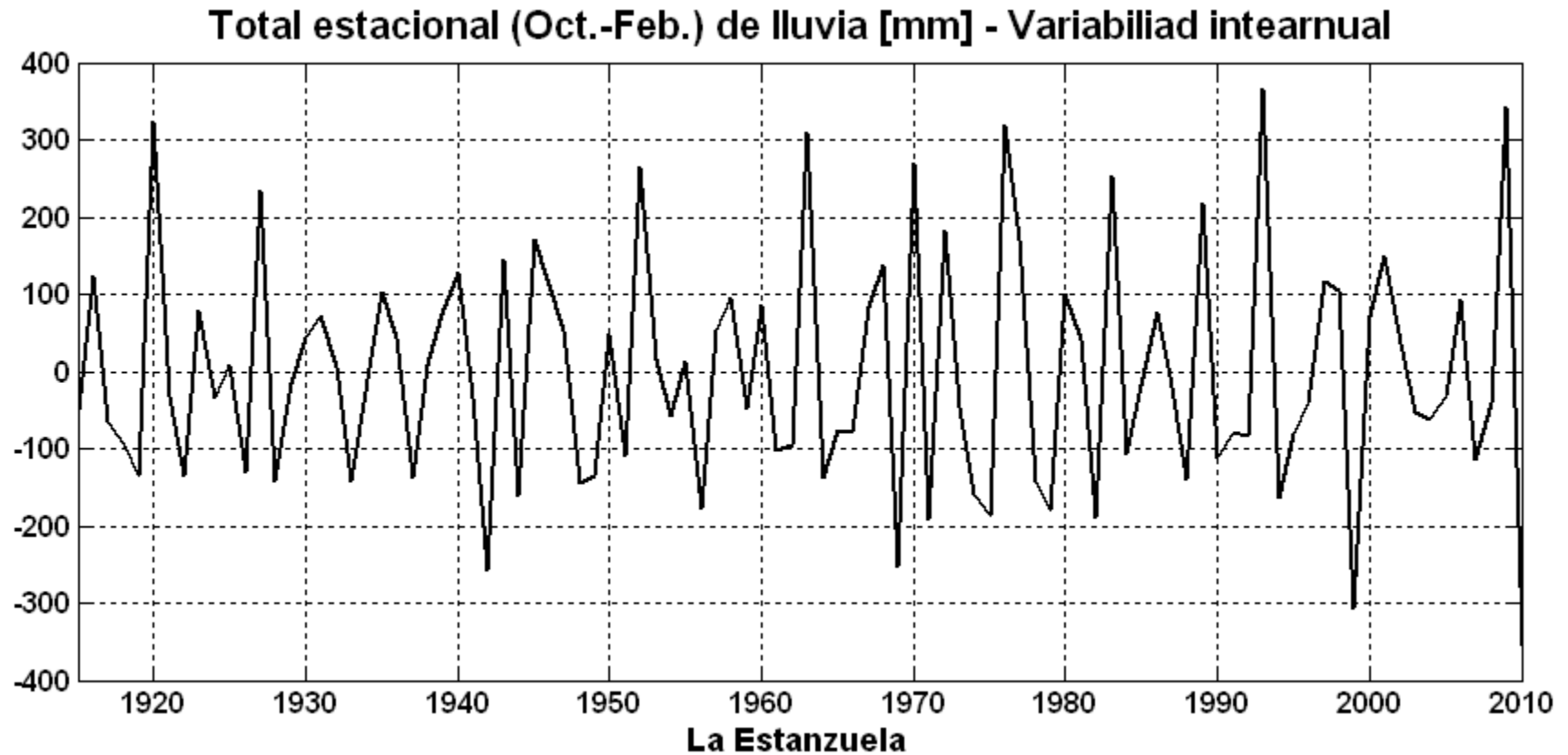


6% de la varianza

Variabilidad en escala decadal: 10% de la varianza

ESCALAS TEMPORALES DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Un ejemplo



Tendencia: +/- 75mm

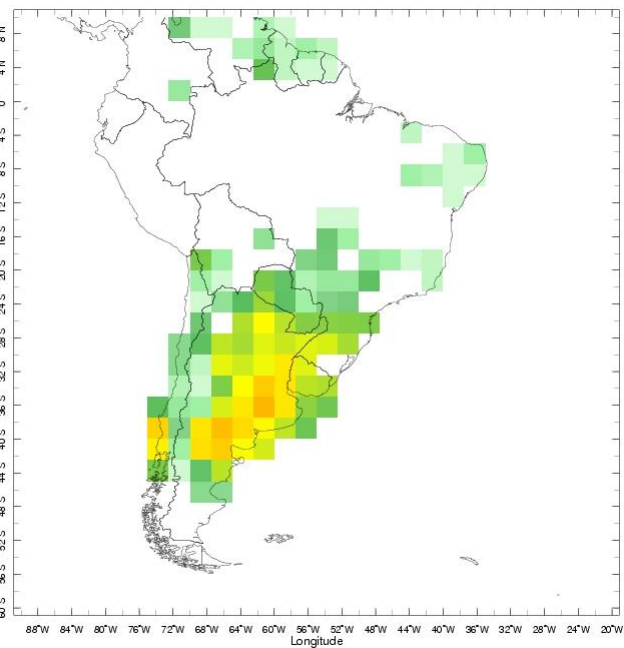
Decadal: +/- 100mm

Interanual: +/- 350mm

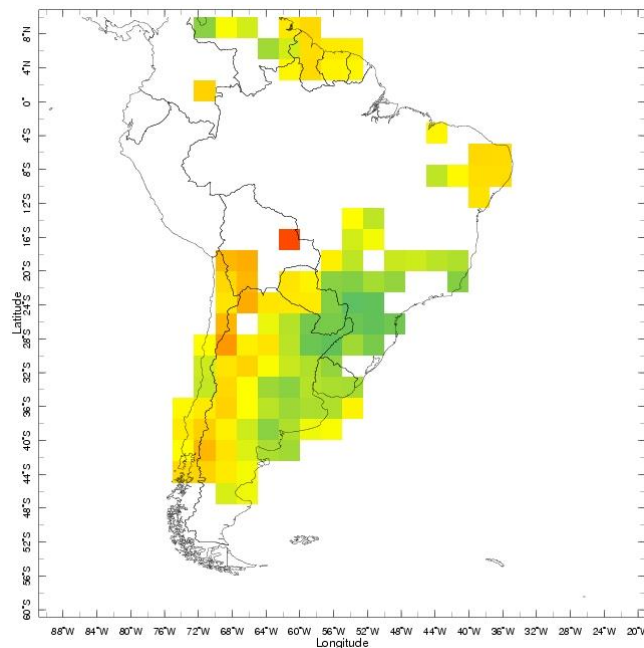
ESCALAS TEMPORALES DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Resumen Regional en Precipitación

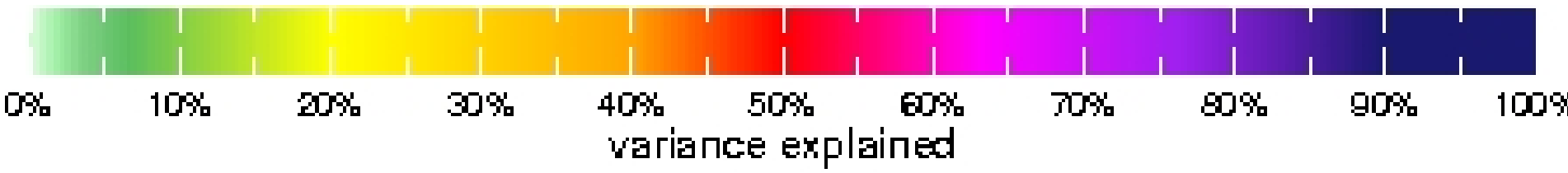
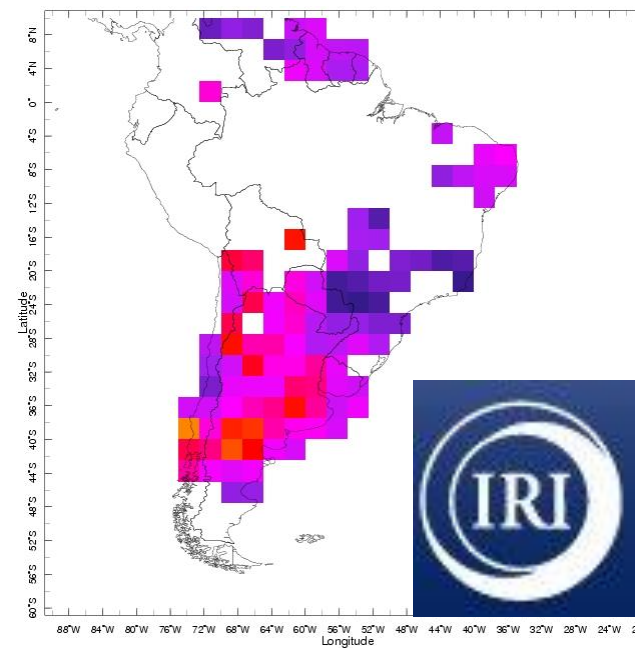
Tendencia



Decadal



Interanual



TENDENCIAS EN MEDIAS DE PRECIPITACIÓN

Estación Pluviométrica		Tendencia [mm/año]	Significancia Estadística		
			Anual	Verano	Invierno
1	Prado	1,7	99,7 %	99,9 %	55,9 %
2	Colonia	2,3	99,9 %	99,9 %	39,4 %
3	Paysandú	2,7	99,6 %	99,9 %	23,5 %
4	Mercedes	5,2	99,9 %	99,9 %	93,2 %
5	Salto	4,4	99,0 %	99,9 %	92,2 %
6	Rivera	3,6	99,0 %	99,5 %	86,4 %
7	Melo	5,5	99,9 %	99,9 %	99,9 %
8	Treinta y Tres	4,7	99,9 %	99,9 %	<u>97,5 %</u>
9	Rocha	4,4	99,9 %	99,9 %	<u>98,6 %</u>

1919-2008 (90 años)

TENDENCIAS EN SEQUÍAS

Son múltiples las definiciones de sequías en función de el sistema físico que se analiza:

- ❖ Meteorológicas, agronómicas, hidrológicas ...

y de las escalas temporales de mayor interés:

- ❖ Semanas a meses (rachas secas)

- ❖ Trimestrales, semestrales

- ❖ Anuales, multianuales

Numerosos estudios no han encontrado tendencias a sequías mayores y/o más intensas

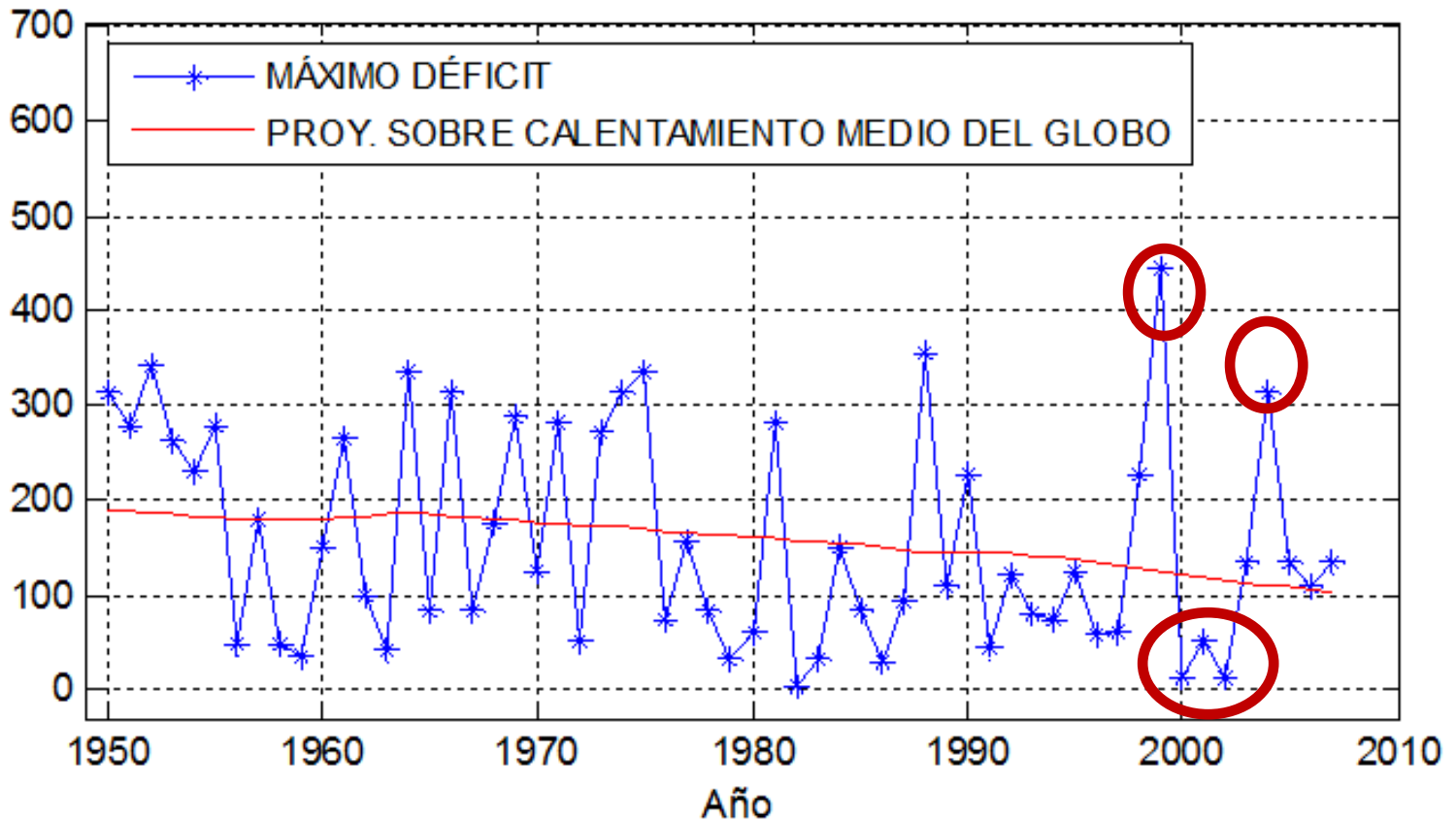
- ❖ Es difícil encontrar tendencias en eventos extremos

- ❖ ¿Es esto compatible con el aumento de precipitación?

TENDENCIAS EN SEQUÍAS

Máximo déficit en acumulado de lluvia (respecto al climatológico) a partir de la salida del invierno de cada año

MELO



SECA 2020-23



Instituto Uruguayo de Meteorología

Área de Meteorología y Clima para la Sociedad
Dirección

Montevideo, 12 de mayo de 2023

SEQUÍA METEOROLÓGICA en URUGUAY
2020 - 2023
(actualización)

SECA 2020-23

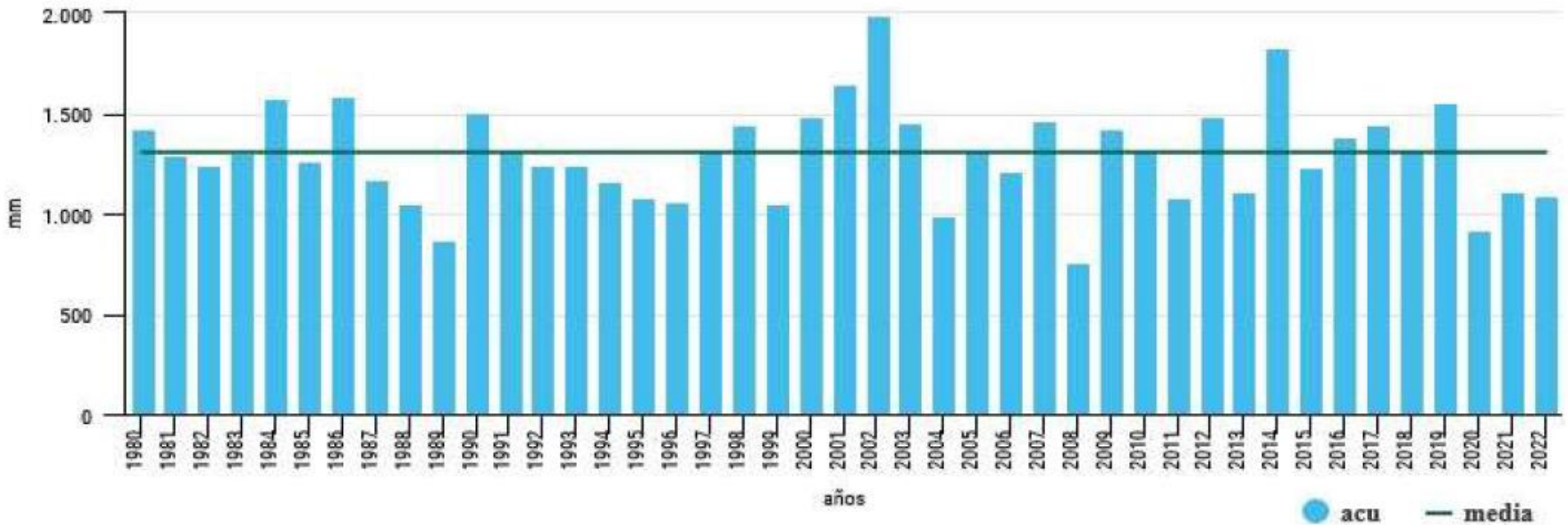


Figura 1 - Promedio acumulado anual a escala país desde 1980 al 2022.

SECA 2020-23

Se destaca que los últimos 3 años (en rojo) han sido extremadamente secos, siendo el tercero más seco el 2020 (914 mm), el décimo primero más seco el 2021 (1108 mm) y el décimo más seco de la serie 1981-2022, el año 2022 (1086 mm).

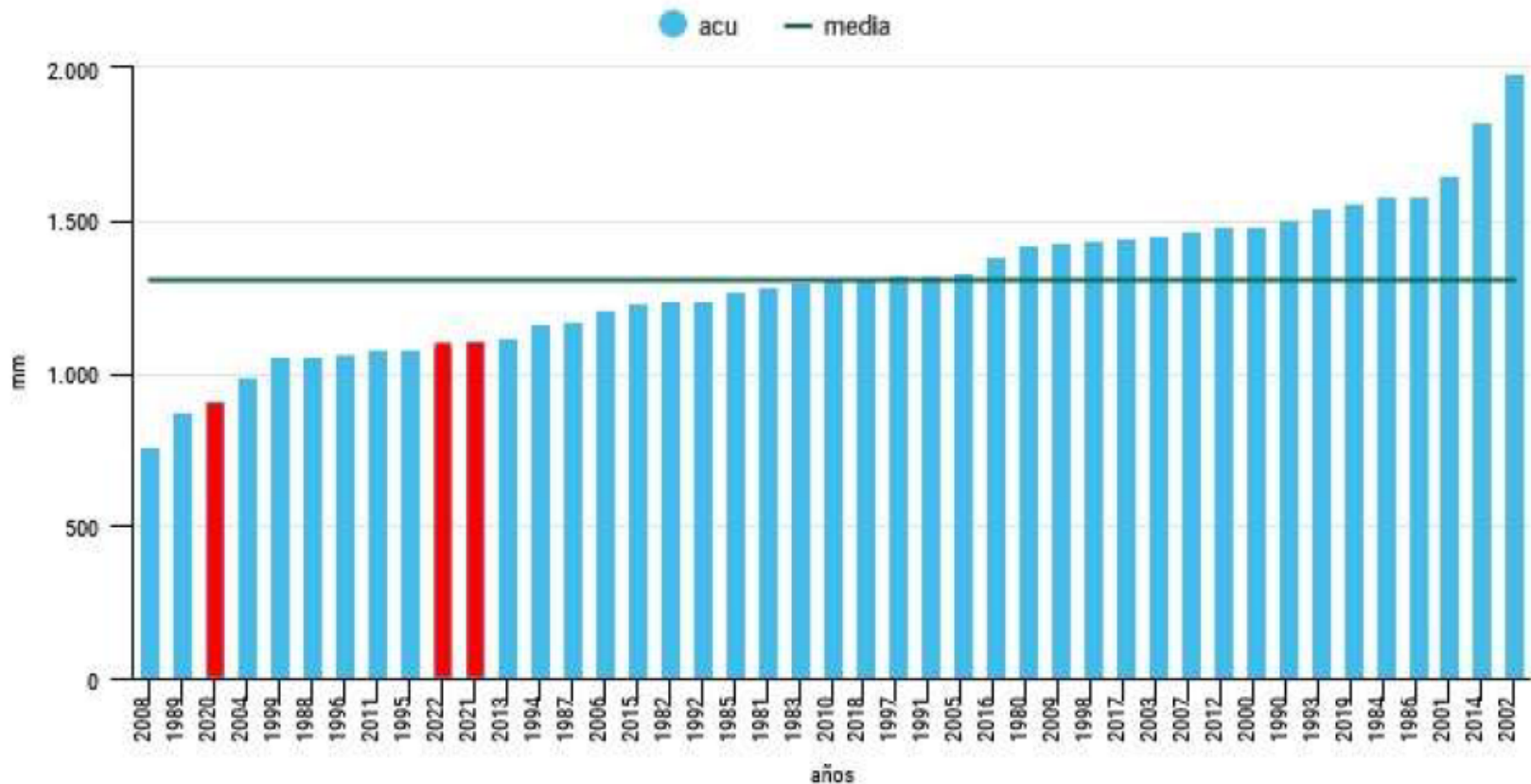


Figura 2 - Precipitaciones acumuladas anuales ordenadas de menor a mayor sobre Uruguay y valor medio (línea verde).

SECA 2020-23

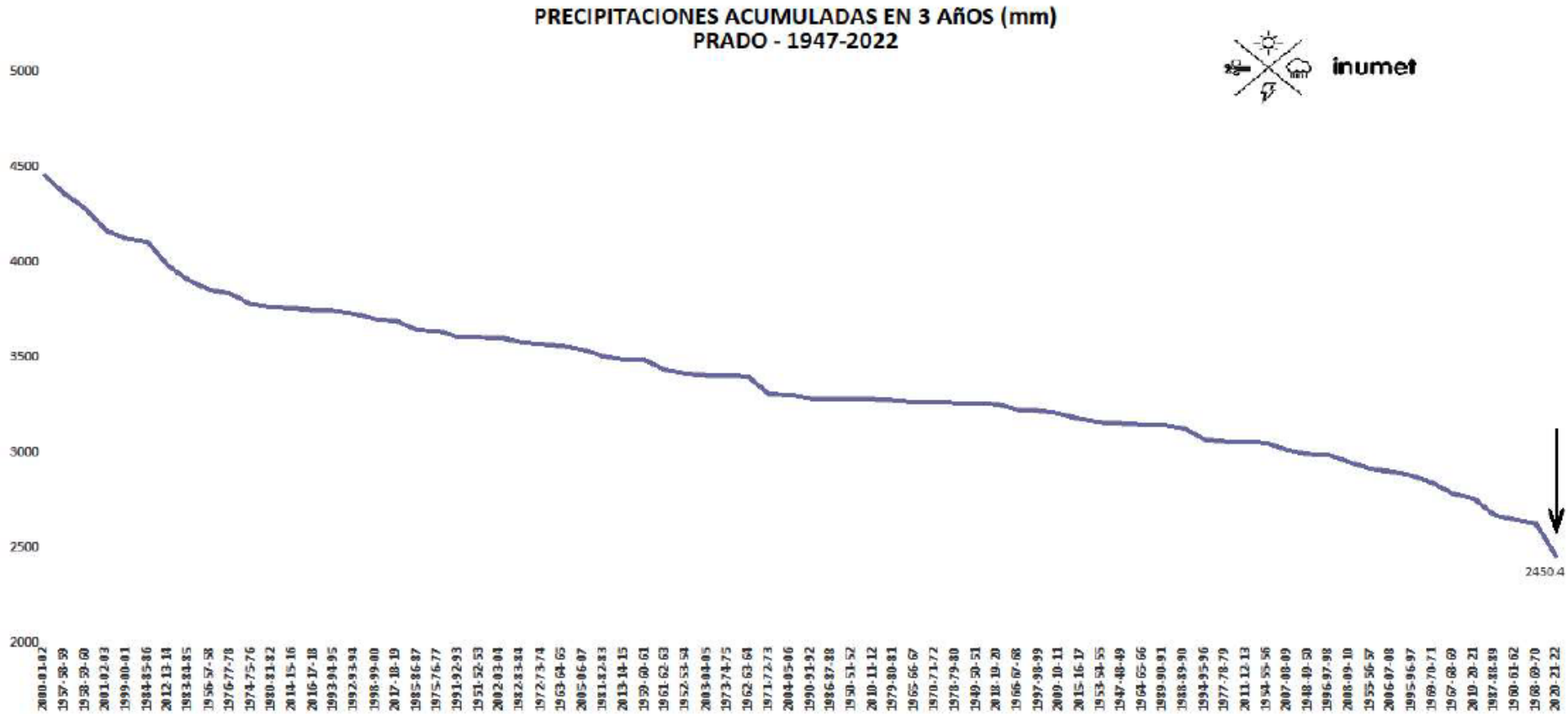
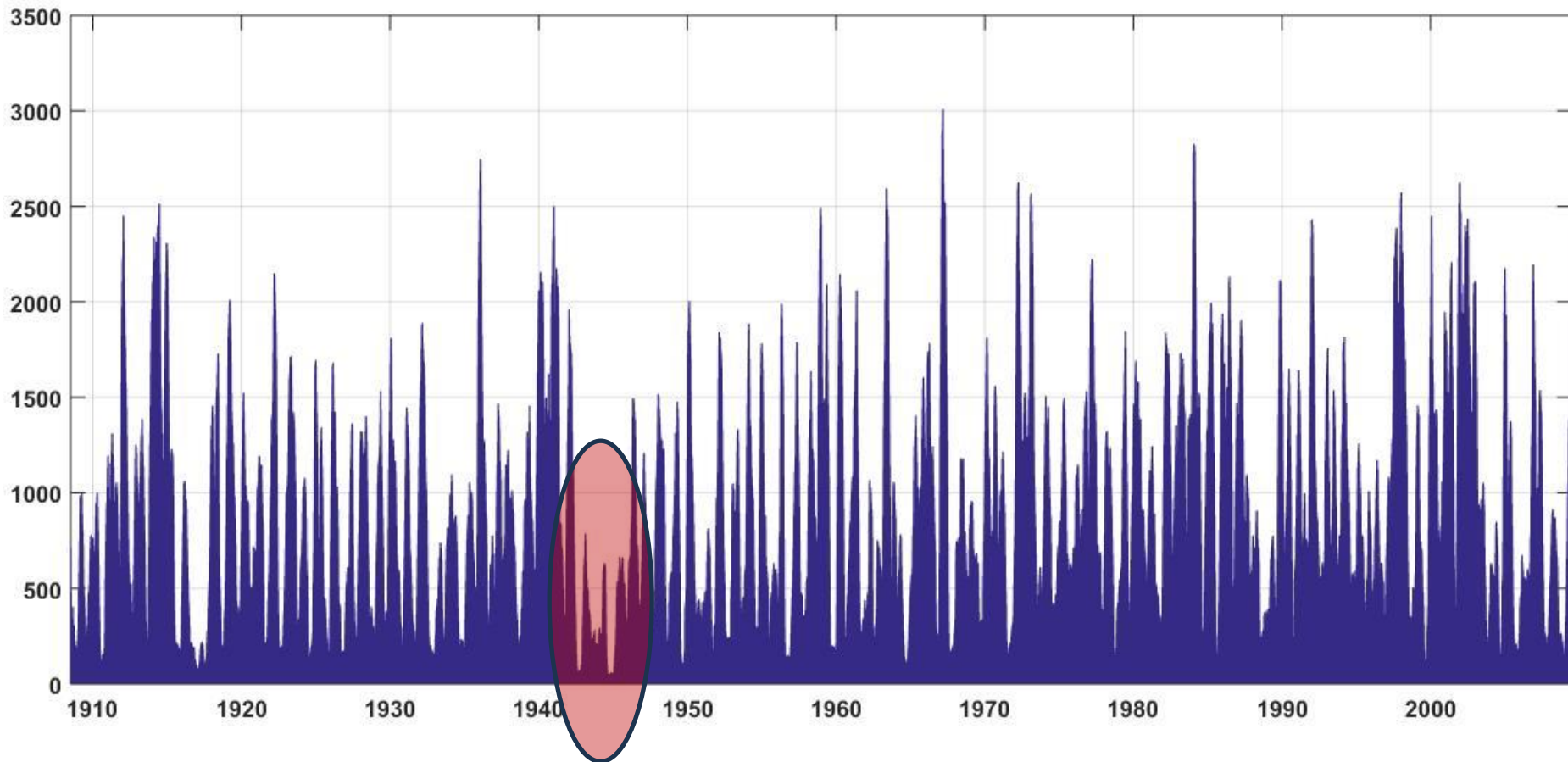


Figura 6 - Acumulados trianuales de precipitación para la Estación Meteorológica de Prado en Montevideo (1947-2022).

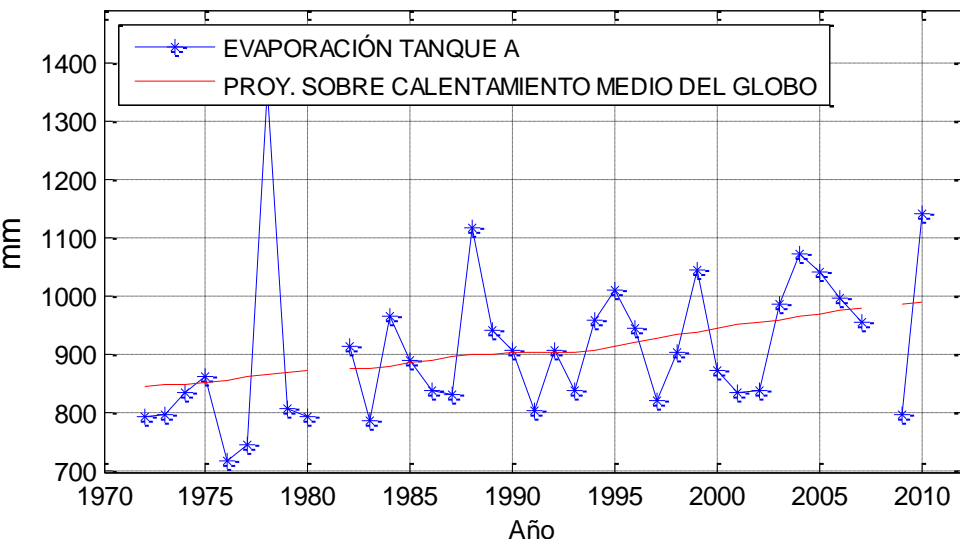
SECA 2020-23

Caudal Bonete

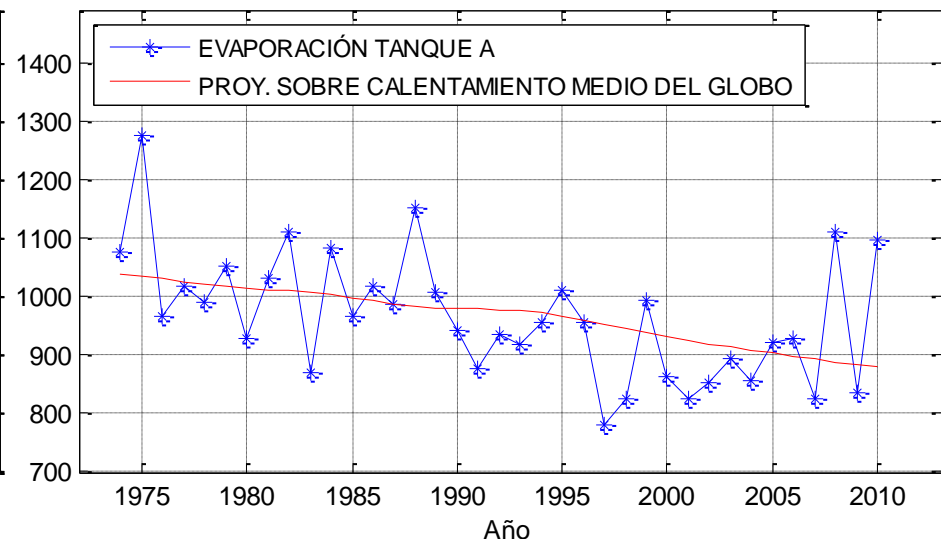


TENDENCIAS DE EVAPORACIÓN

TREINTA Y TRES Octubre - Febrero



LAS BRUJAS Octubre - Febrero

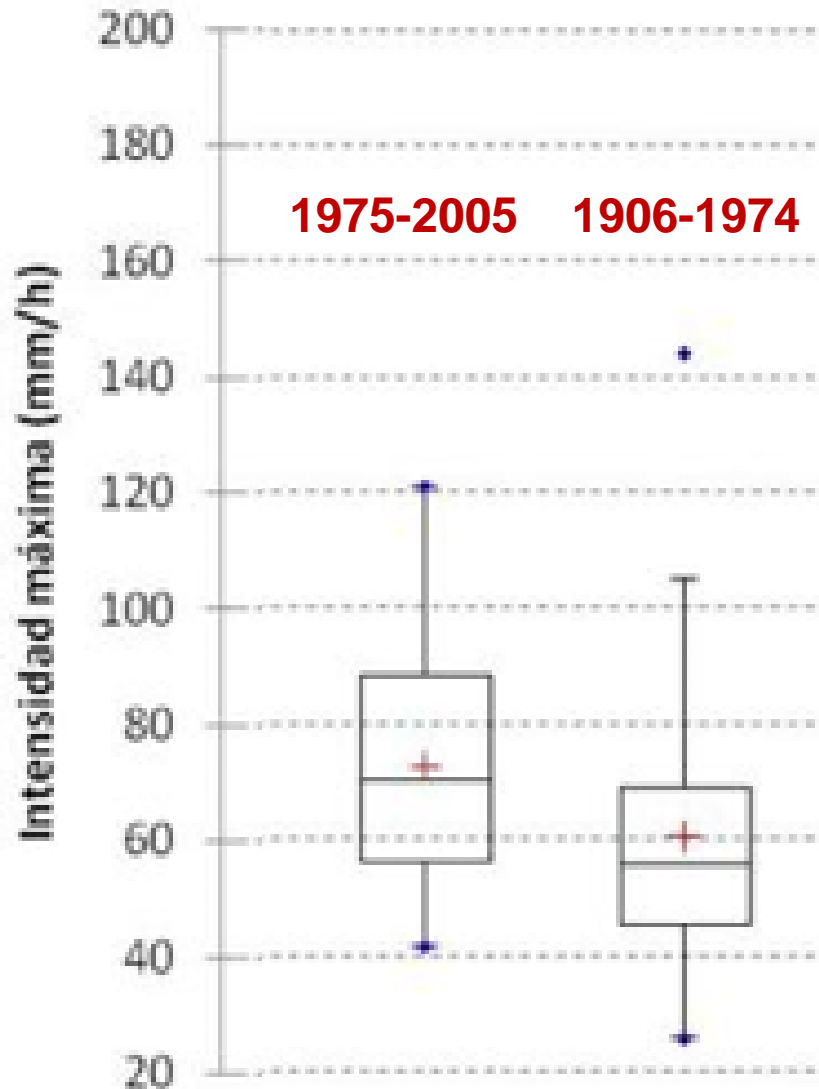


	EST.	LB	SALTO	TAC.	TyT
SIG. KENDALL	-18,56	-99,86	60,67	57,27	99,68
COEF. L. mm/año)	0,40	-4,76	0,82	1,24	3,95

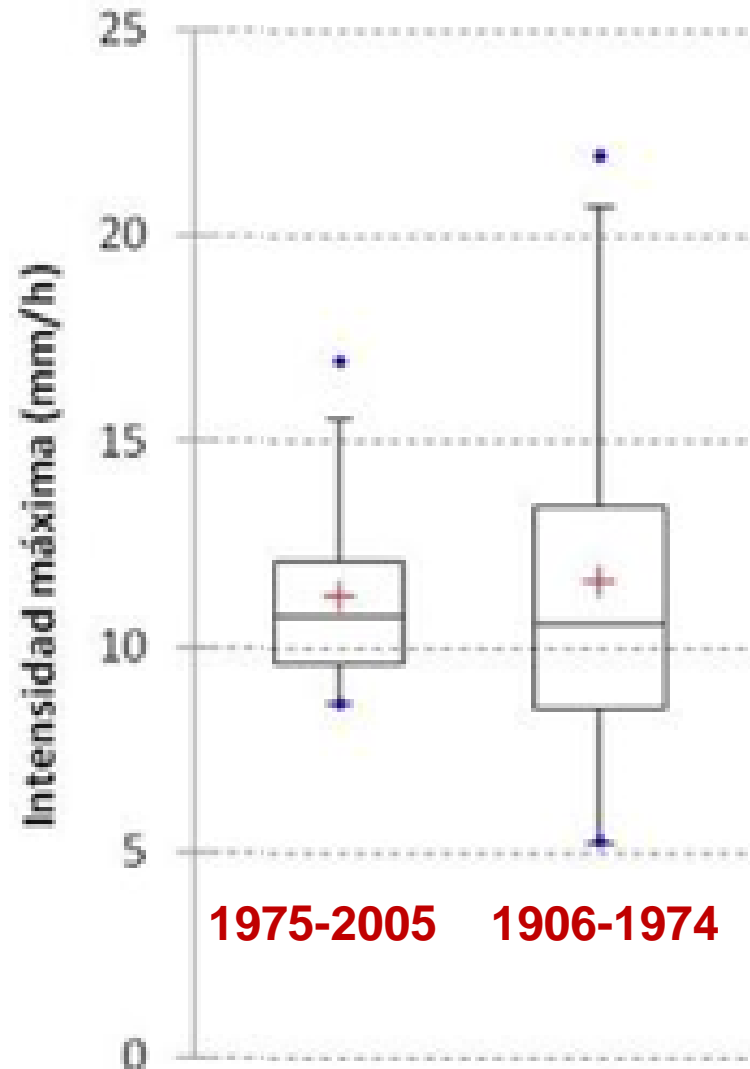
Rojo y Azul oscuro: significativo al 90%
 Rosado y celeste: significancia menor del 90%

INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN - MONTEVIDEO

20 minutos



6 horas



Silveira et al 2014

INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN - MONTEVIDEO

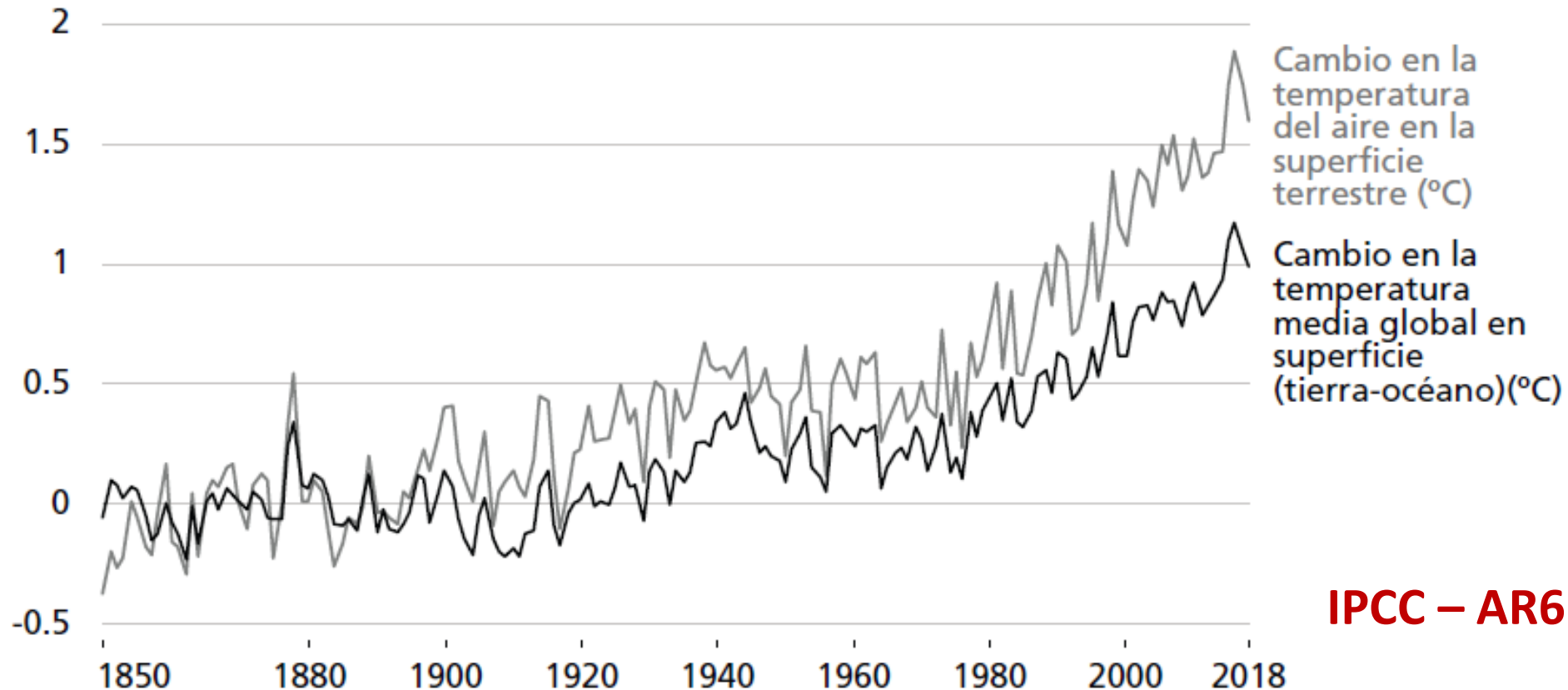
Duración	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 20 años
20 min	12,6 %	13,7 %	14,5 %
6 h	-7,2 %	-11,7 %	-15,0 %

Diferencias entre los valores de precipitación del escenario actualizado (1975-2005) y la serie histórica (1906-1974)

MIRADA GLOBAL A CAMBIOS EN EL CLIMA

Calentamiento Global: Es inobjetable y evidente

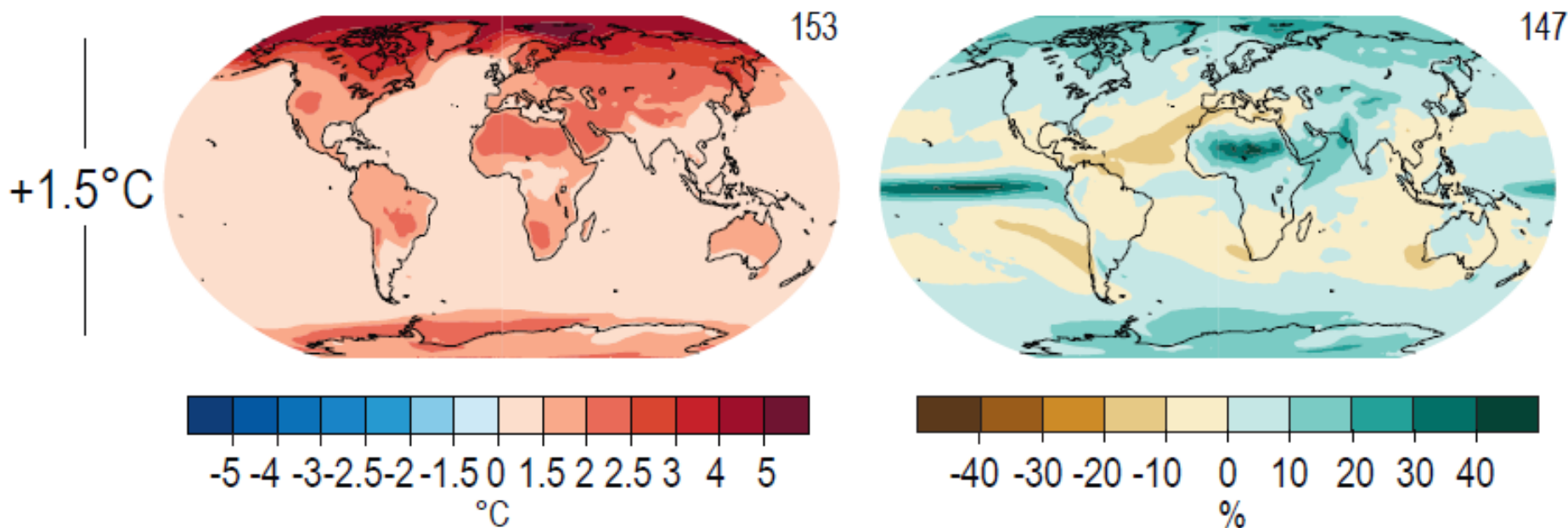
CAMBIO en la TEMPERATURA respecto a 1850-1900 (°C)



IPCC – AR6

MIRADA GLOBAL A CAMBIOS EN EL CLIMA

NO es espacialmente homogéneo



A pequeñas escalas, cambios en el uso del suelo, polución, circulaciones locales, etc, dificultan la cuantificación del impacto de los GEI en el clima local

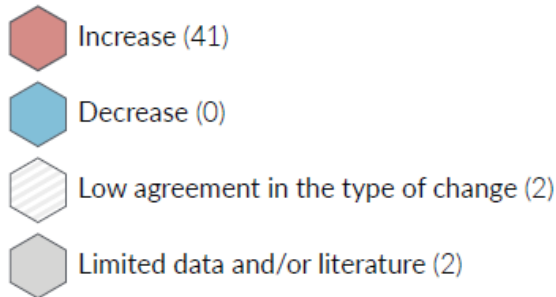
Cuanto menor la escala, más difícil aún el problema de la **“atribución”** y más incierto el pronóstico

MIRADA GLOBAL A CAMBIOS EN EL CLIMA

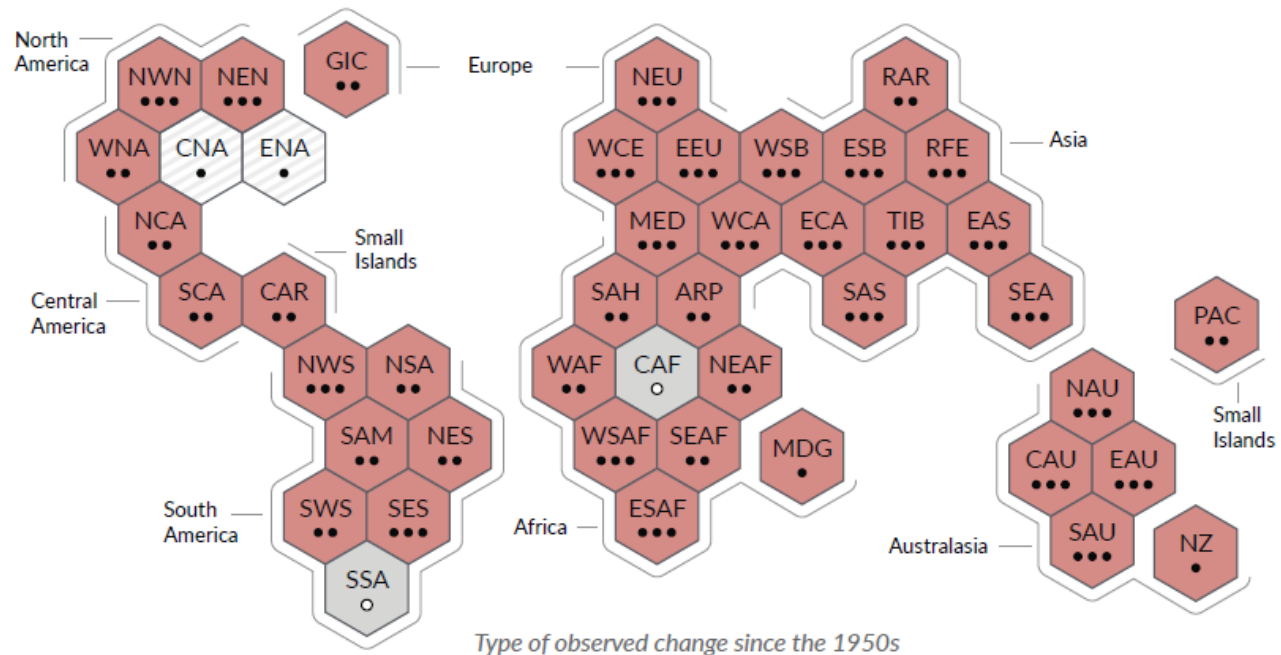
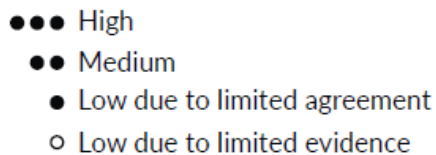
Se manifiesta principalmente en extremos

(a) Synthesis of assessment of observed change in **hot extremes** and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions

Type of observed change
in hot extremes



Confidence in human contribution
to the observed change

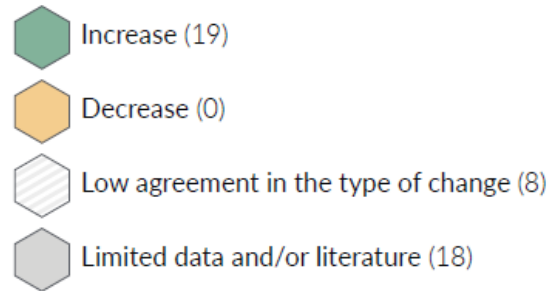


MIRADA GLOBAL A CAMBIOS EN EL CLIMA

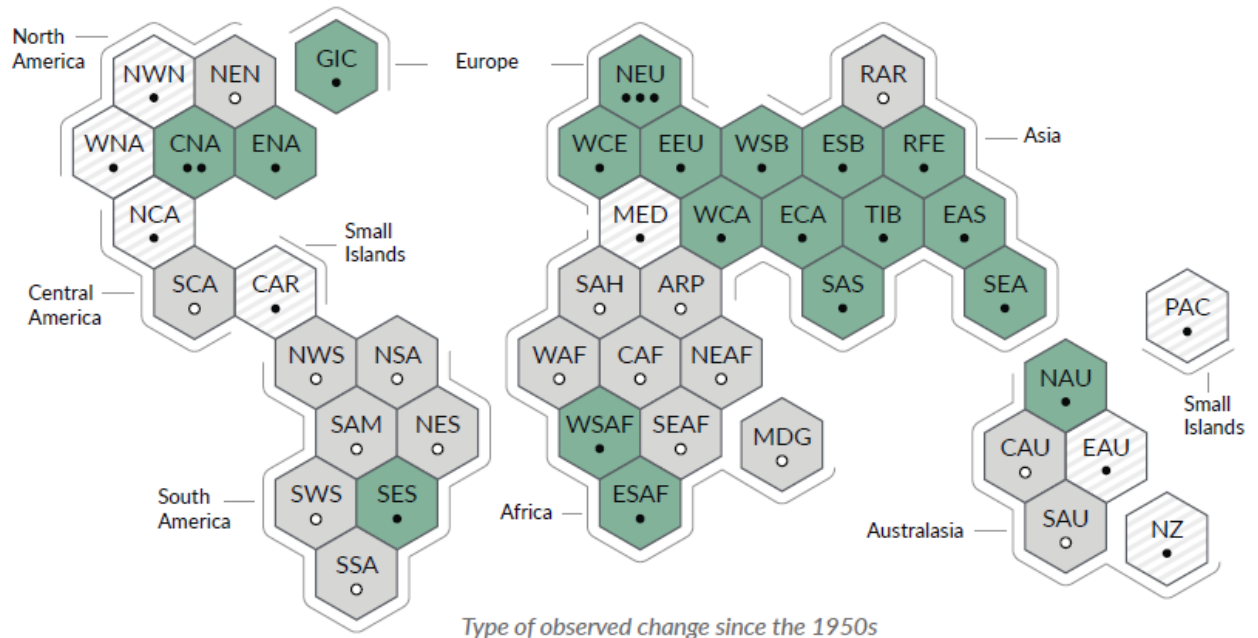
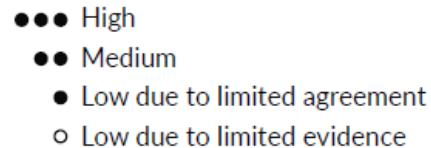
Se manifiesta principalmente en extremos

(b) Synthesis of assessment of observed change in **heavy precipitation** and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions

Type of observed change
in heavy precipitation



Confidence in human contribution
to the observed change



MIRADA GLOBAL A CAMBIOS EN EL CLIMA

Se manifiesta principalmente en extremos

(c) Synthesis of assessment of observed change in **agricultural and ecological drought** and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions

Type of observed change

in agricultural and ecological drought

● Increase (12)

● Decrease (1)

○ Low agreement in the type of change (28)

○ Limited data and/or literature (4)

Confidence in human contribution

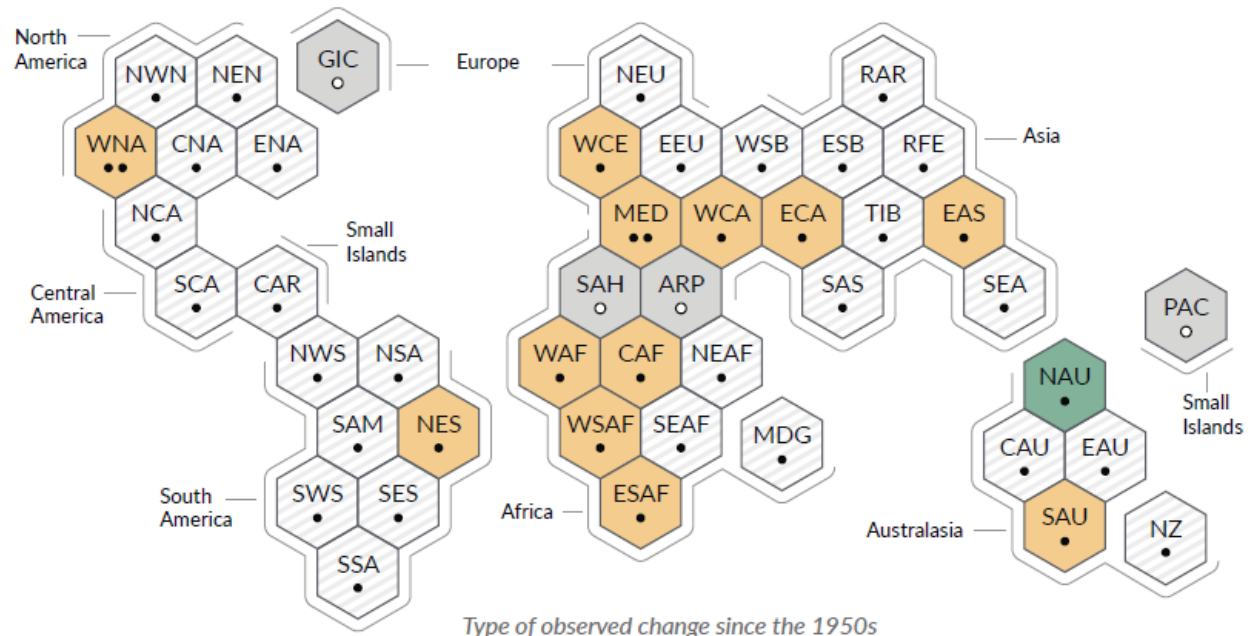
to the observed change

●●● High

●● Medium

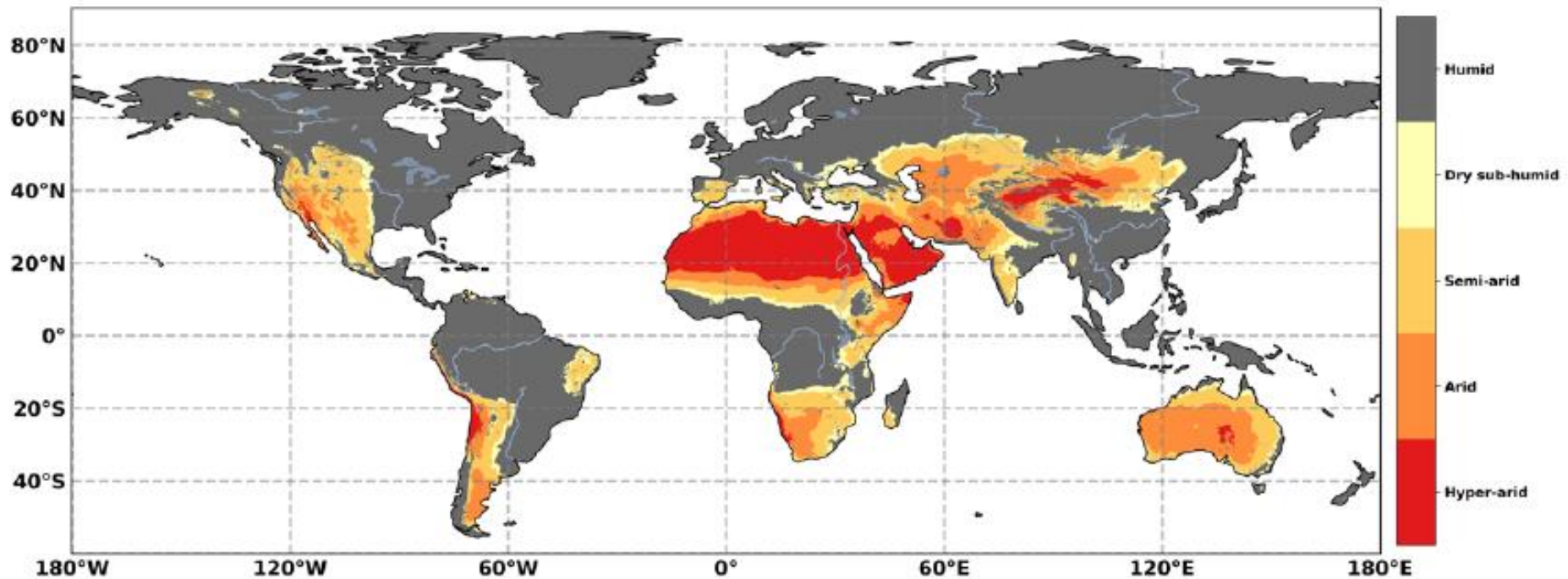
● Low due to limited agreement

○ Low due to limited evidence



MIRADA GLOBAL A CAMBIOS EN EL CLIMA

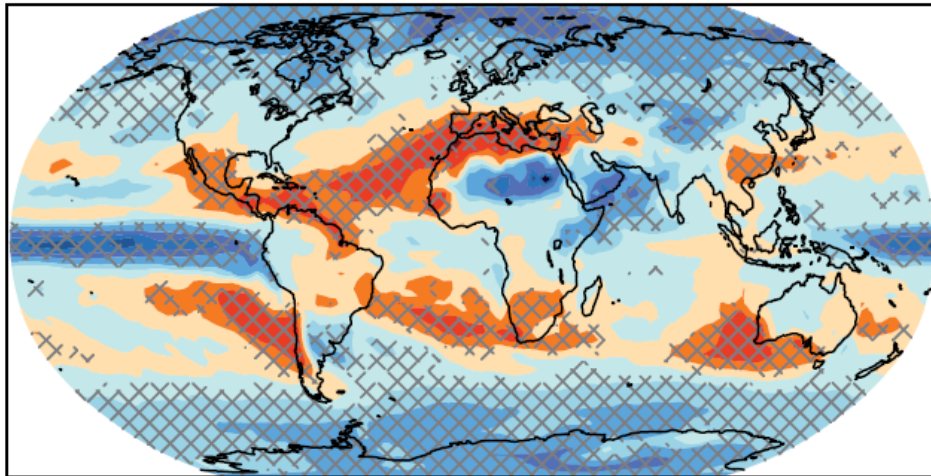
Acentúa riesgos tradicionales



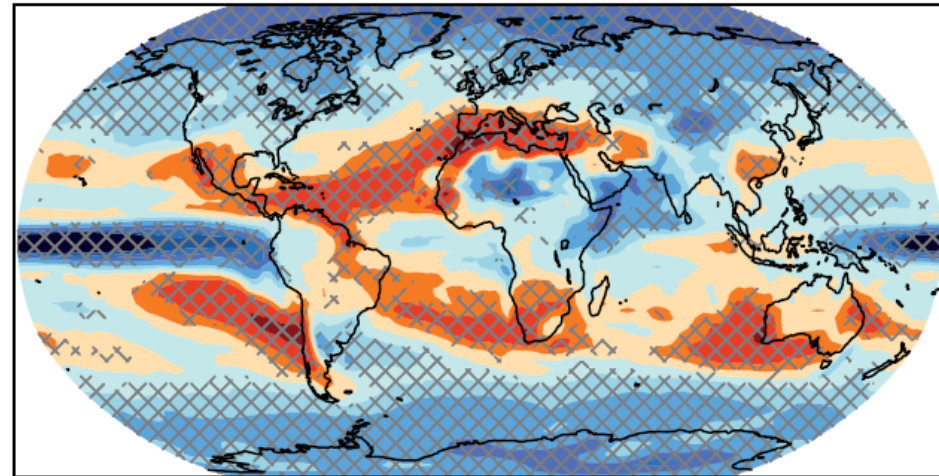
MIRADA GLOBAL A CAMBIOS EN EL CLIMA

El “efecto Mateo”

Mean precipitation change
at 1.5°C GMST warming



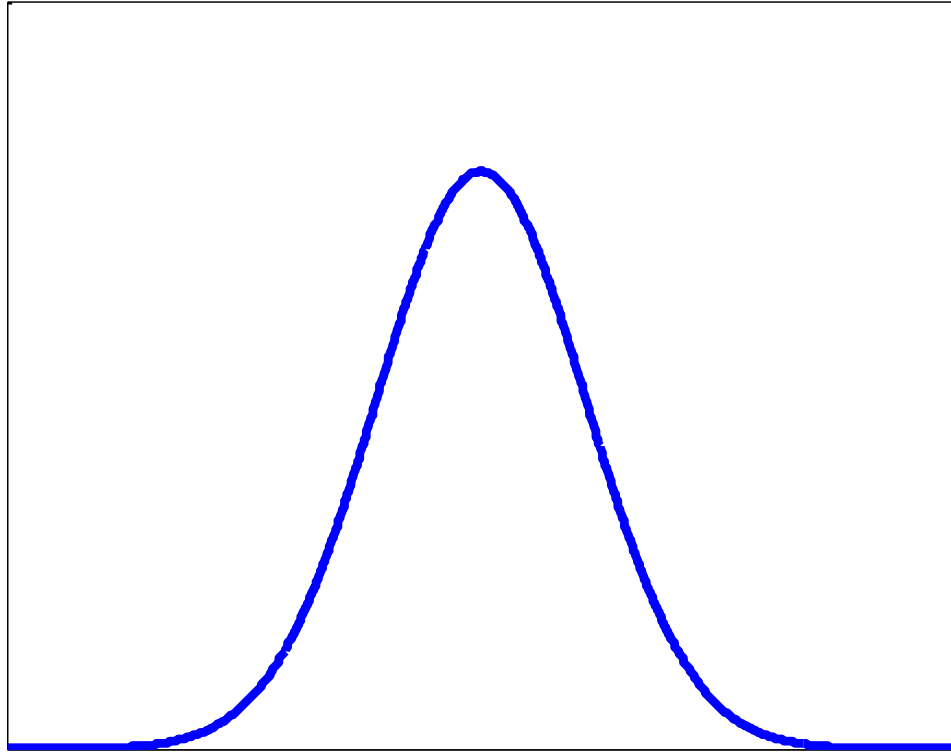
Mean precipitation change
at 2.0°C GMST warming



Precipitation (%)



EL CLIMA ES LO QUE ESPERAMOS



Lo representamos por una distribución de la cual podemos derivar los estadísticos de interés al caso

Todo lo cual estimamos del pasado

NO ESTACIONARIEDAD DE PARÁMETROS DE DISEÑO

❖ Mirada al pasado

- ✓ En variables hidrometeorológicas locales
- ✓ En una mirada de cambio climático global

❖ Proyecciones y escenarios

- ✓ Causalidades
- ✓ Modelos de base física
- ✓ Proyecciones estadísticas

❖ ¿Cómo abordar el diseño?

CERTEZAS Y INCERTIDUMBRE

En relación al Cambio Climático

- ❖ Hay multitud de señales globales inequívocas con proyecciones firmes en muchas variables (temperatura, nivel del mar) pero no tanto en otras (precipitación).
- ❖ Sin embargo, a escala regional y local hay mucho mayor incertidumbre sobre la evolución futura de las variables hidrometeorológicas.
- ❖ A nivel local, las salidas de modelos climáticos deben ser tomadas como escenarios posibles y no proyecciones cuantitativas.

CERTEZAS Y INCERTIDUMBRE

En relación al Cambio Climático

- ❖ En particular, muchos de los eventos hidrológicos que son parámetros de diseño refieren a estadísticos cuya evolución es difícil de predecir y no son bien representados por los modelos climáticos (sequías críticas, tormentas de diseño).
- ❖ Por ejemplo, en general se espera una aceleración del ciclo hidrológico. Pero las tendencias pueden ser ambiguas y depender de la duración de la tormenta.
- ❖ Es clave mantener una actitud vigilante y fortalecer el monitoreo.

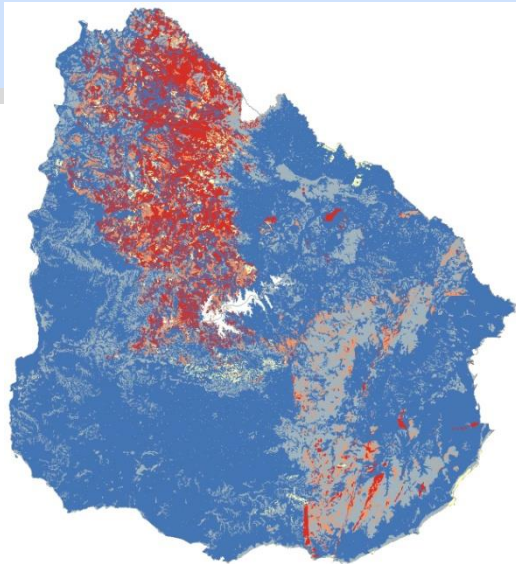
CERTEZAS Y INCERTIDUMBRE

- ❖ Puede haber otras razones para cambios percibidos en el ciclo hidrológico (p.e. cambios de uso del suelo) cuya proyección a futuro es también incierta.
- ❖ Sin un entendimiento de las causalidades subyacentes las proyecciones estadísticas (extrapolar linealmente lo que viene ocurriendo) tampoco tienen sustento.
- ❖ La construcción de escenarios (por mecanismos varios) es un método para imaginar situaciones que potencialmente podemos enfrentar, sin necesariamente asignar una probabilidad a los mismos.

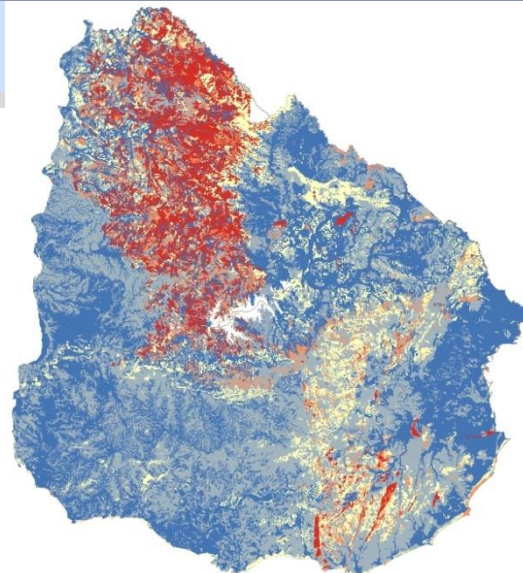
Sensibilidad de Déficit de P – ETP a ETP

Mapa de frecuencia (%) en que el déficit es igual a la capacidad de almacenamiento del suelo

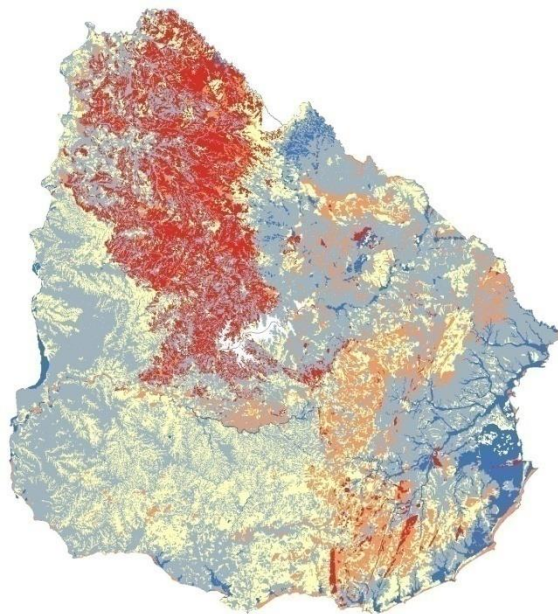
a) ETP menos 10%



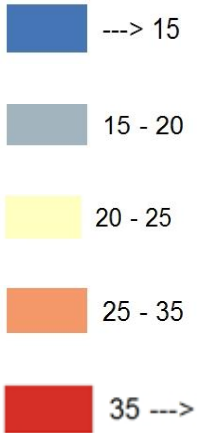
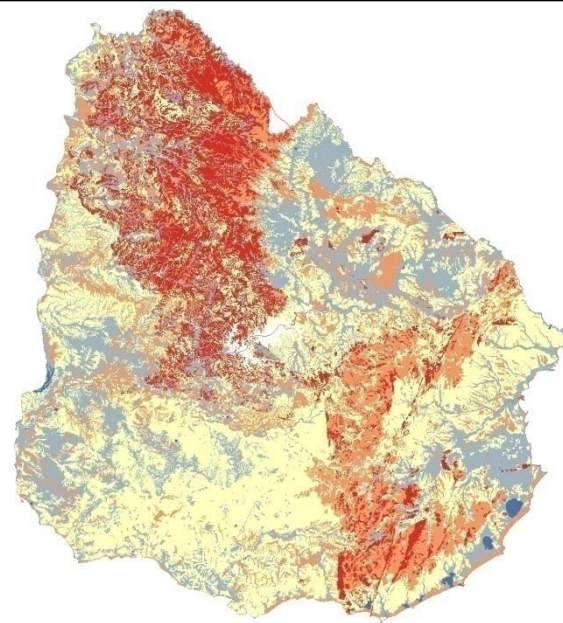
b) ETP climatológico



c) ETP más 10%



d) ETP más 20%



NO ESTACIONARIEDAD DE PARÁMETROS DE DISEÑO

❖ Mirada al pasado

- ✓ En variables hidrometeorológicas locales
- ✓ En una mirada de cambio climático global

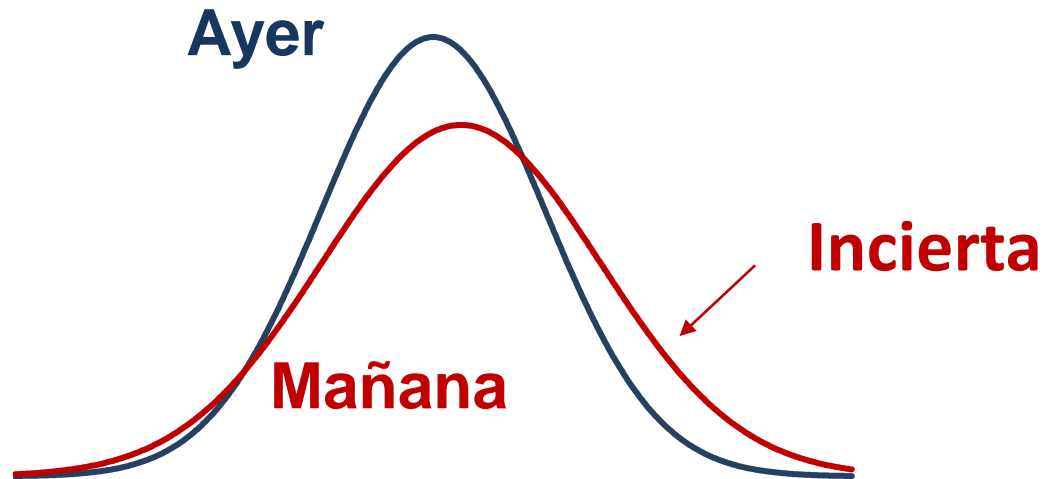
❖ Proyecciones y Escenarios

- ✓ Causalidades
- ✓ Modelos de base física
- ✓ Proyecciones estadísticas

❖ ¿Cómo abordar el diseño?

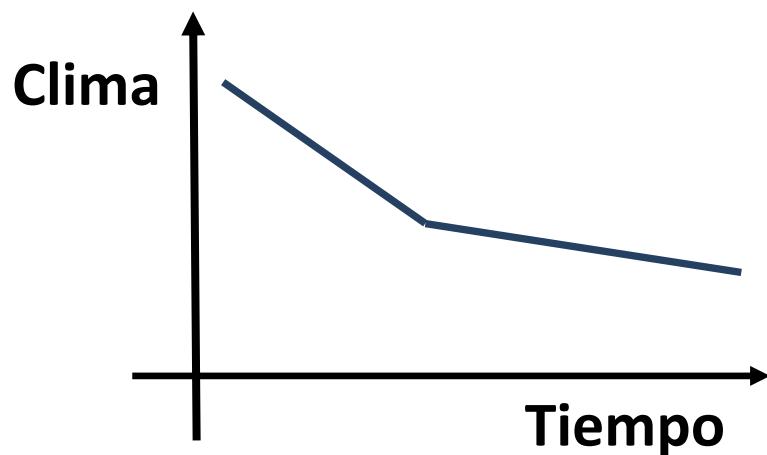
PARÁMETROS DE DISEÑO

¿Qué estadístico de qué variable climática determina el diseño?



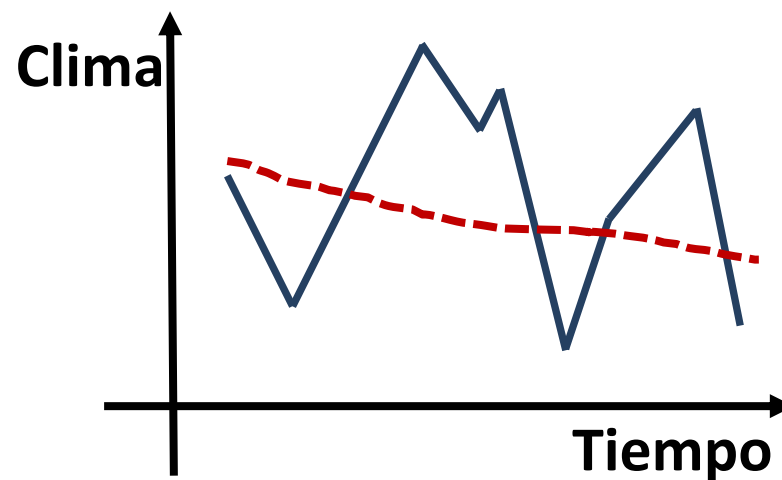
DOS TIPOLOGÍAS ESQUEMÁTICAS

A



Tendencia domina
sobre variabilidad
Proyección clara

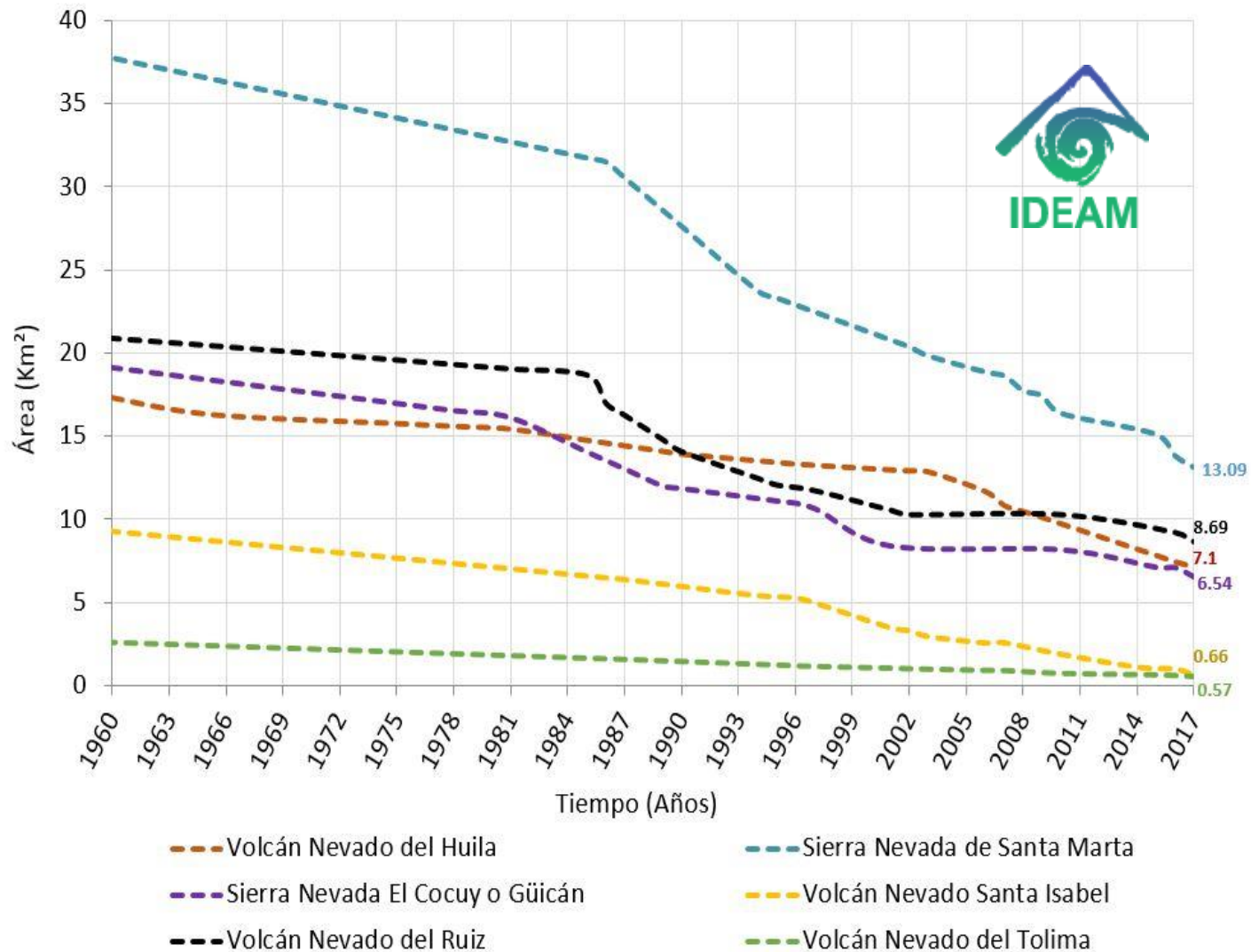
B



Variabilidad domina
sobre tendencia
Proyección incierta

A) TENDENCIA DOMINA SOBRE VARIABILIDAD

EVOLUCIÓN DEL ÁREA GLACIAR EN COLOMBIA 1960 - 2017



A) TENDENCIA DOMINA SOBRE VARIABILIDAD

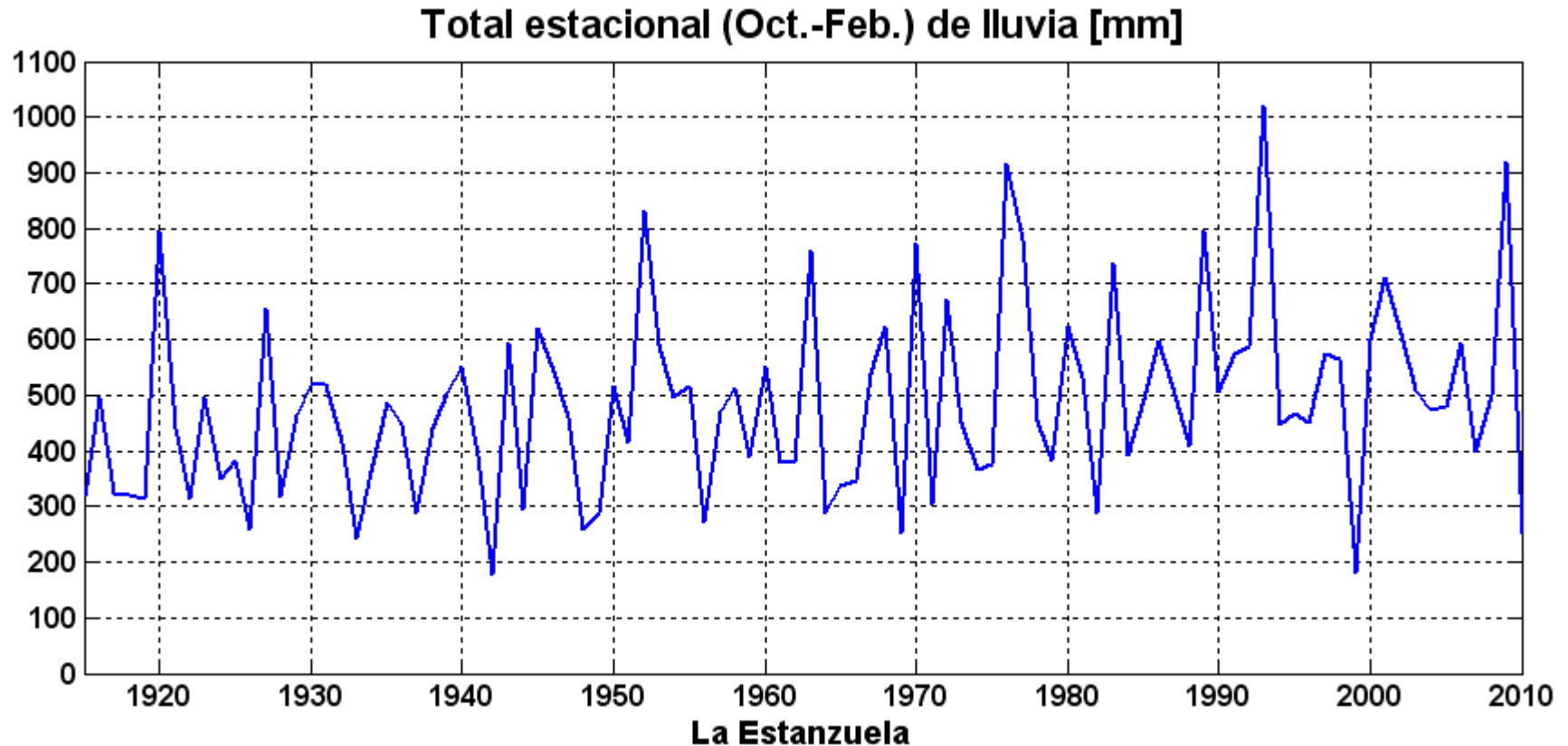
Se conoce el escenario
y el horizonte temporal con cierta precisión

El abordaje, **¿a qué me adapto?** es natural y accionable:
hay que diseñar alternativas en el nuevo escenario

Paradigmas Predictivo



B) VARIABILIDAD DOMINA SOBRE TENDENCIA



Al punto que a veces es difícil distinguir tendencia y es incierta la misma

B) VARIABILIDAD DOMINA SOBRE TENDENCIA

El énfasis en **¿a qué me adapto?** claramente no funciona, es paralizante por la incertidumbre del futuro.

Además, la gran variabilidad suele ser ya un problema y una gran preocupación, hay un **déficit de adaptación**.

Énfasis en **¿qué adapto?**

B) VARIABILIDAD DOMINA SOBRE TENDENCIA

Gestionar mejor la incertidumbre asociado al clima de HOY
generando una cultura de gestión de riesgos

Accionable, construir adaptabilidad HOY
lo cual devendrá en sistemas más resilientes al cambio
climático

Monitorear y estar atento a los cambios

Paradigmas Adaptativo



CUATRO TIPOLOGÍAS ESQUEMÁTICAS

Infraestructura

Diseño
Adaptado

Diseño Adaptativo
Gestión Adaptativa
¡Innovar!

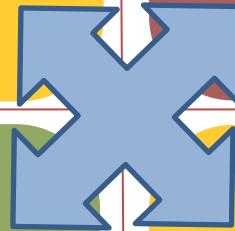
Procesos

Adaptación
Continua

Gestión Adaptativa
de Riesgos
Hidro-Climáticos

Tend (cierta) > Var

Var > Tend (incierto)



DISEÑO HIDROLÓGICO



Edición 2023

Rafael Terra

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

rterra@fing.edu.uy